

Az elektromos kapacitás, a gyökérméret és -aktivitás kapcsolata

Rajkai Kálmán¹, R. Végh Krisztina¹ és Nacsa Tibor²

¹ MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete, Budapest

² N-Telekom Kft., Kiskunhalas

Abstract. Electrical capacitance for in situ detection of the root size and function. An in situ electrical measurement method for the detection of living root systems of herbaceous plants is presented. The measured root capacitance values are interpreted on a dielectric basis. The recommended series-connected root and soil capacitance model allows higher root capacitance due either to higher root capacitance or to a branching, more active root system having larger contact surface with the soil and it even allows the interpretation of the soil water content as affecting the capacitance of the soil. Root capacitance values measured on different growth stages of sunflower plants showed higher root capacitance for bigger root mass and length. Aside the needle plant electrode, a simple, non plant-wounding tweezers electrode was also studied. The measurements were carried out under controlled lab conditions on sunflower plants raised in pots with different soil water content and were then repeated after the plant was washed free of soil and placed in water. A comparison of the tweezers electrode clipped on to the stem above the root crown or the needle electrode inserted into the suction zone of the root crown showed that the root capacitance was very similar when the plants were placed in water. The deviation of the needle and tweezers electrode use increased in pot measurements as the soil water content decreased. Beside the capacitance, the phase angle was also measured for plants rooted in soil, and for a piece of root and soil separately, as a function of measuring frequency. The capacitance, and phase angle values indicated ohmic rather than capacitive character. Further investigations will be required to verify both the series-connected capacitances model and the tweezers plant electrodes in root capacitance measurements.

A növények életműködésének, különösen a gyökérzet aktuális állapotának megjelenítése ökológiai és mezőgazdasági szempontból egyaránt kiemelt jelentőségű. A gyökér mérete és aktivitása a növény tápanyag- és vízfelvételét is jellemzi. A gyökérzet közvetlen megfigyelése, növekedésének, aktivitásának tanulmányozása a szilárd, átlátszatlan talajban nagyon korlátozottan lehetséges. A legtöbb vizsgálati módszer a gyökérzetet és a növényt is roncsolja, és lehetetlenné teszi egyetlen növény folyamatos megfigyelését.

A talajmintákból meghatározott gyökértömeg, gyökéreloszlás, valamint

az élő- és holtgyökér vizsgálatok munkaigényesek, értelmezhetőségük pedig az ismeretlen reprezentativitás miatt behatárolt. A minirizotron-módszer — talajba helyezett átlátszó falú üveg- vagy műanyag csőben optikai eszközzel történő gyökérmegfigyelés —, valamint a talaj gyökérszónájából vett bolygatatlan talajminták kimosásával meghatározott gyökérsűrűség — esetenként jelentős — különbsége, a minirizotronos technika korlátaira utal (Andrén et al., 1993).

A mintavételes gyökérvizsgálatok mellett különös érdeklődés övezi azokat a vizsgálati módszereket, amelyek a növények állapotáról — az életműködés befolyásolása nélkül — szolgáltatnak folyamatos információt. Az úgynevezett monitorozó gyökérvizsgálati módszerek közé a növényt nem roncsoló, mintavétel nélküli elektromos eljárások tartoznak (pl. Campbell et al., 1962, Hyde et al., 1964, és Johns et al., 1965a,b).

A gyökérzet méretének — hossz, tömeg és átlagos átmérő —, valamint működési jellemzőinek a megfigyelésére alkalmazott elektromos méréseket (Chloupek, 1972 és 1977, valamint Dalton 1995).

Chloupek (1972) az elektromos kapacitásmérést nagyobb gyökértömegű és szárazságtűrőbb növényegyedek nemesítési célú kiválogatására alkalmazta. Megállapította, hogy a mért gyökérkapacitás-értékeket a talaj nedvességtartalma jelentősen befolyásolja. A gyökérkapacitás-mérést a gyökérszöveti membránok polarizálása érdekében 1 kHz-es, 1 V feszültségű elektromos jellel végezte. Megítélése szerint a mért kapacitásértékek a talaj és a vezetőkek kapacitásától is „szennyezettek” (Chloupek, Skácel és Ehrenbergerova, 1999).

A gyökérkapacitás és a gyökérmorfológia kapcsolatát Kendall és munkatársai elemezték (Kendall et al., 1982). A gyökérnyakba szúrt tűelektróddal mért gyökérkapacitás-eredmények magyarázatára Dalton konceptuális modellt dolgozott ki (Dalton, 1995).

Dalton szerint a mért elektromos kapacitás leginkább az aktív gyökérfelület nagyságát jellemzi. A növényi vízfelvételt szerinte a gyökérfelület a gyökérsűrűségnél jobban jellemzi. A gyökérfelület arra is tartalmaz információt, hogy a gyökérzet mekkora hányada vesz részt a vízfelvételben (Dalton, 1995).

A kapacitásmérés gyökérvizsgálati alkalmazhatóságára végzett vizsgálatokhoz talaj- és homok keverékkel töltött tenyészedényekben és tápoldatban nevelt növényeket alkalmaztunk. Kísérleteinkben a növényt nem sebző, különböző szárméretre és szártípusra helyezhető növényelektród kipróbálását, valamint megfelelő érzékenységgű, könnyen kezelhető, terepen is használható, olcsó kapacitásmérő készülék kiválasztását is célul tűztük ki.

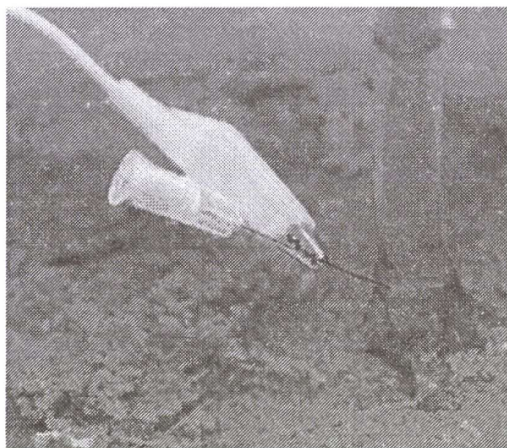
Módszertani vizsgálataink során a talajban gyökerező növény gyökérkapacitásán kívül megmértük a talaj és a gyökér (gyökérdarab) elektro-

mos kapacitását, és meghatároztuk a kapacitásértékek frekvenciafüggését is. A mérési eredmények magyarázatára az irodalomban közölttől különböző gyökérkapacitás-értelmezést dolgoztunk ki. A gyökérkapacitás mennyiségi információtartalmának megállapítása érdekében a növények gyökértömegét és gyökérhosszát is megmértük.

Tenyészedény-kísérletek

A 2 literes műanyag tenyészedényekben a napraforgókat magról virágzásig (18 leveles fejlettség) neveltük 4 rész mezősegi talaj és 1 rész mosott folyami homok keverékben, amelyek tápanyag- és nedvességtartalmát vetéskor optimális értékűre állítottuk. A napraforgókat — kontrollált hőmérsékleti és fényviszonyok között — klímakamrában, nyolc hetes korukig neveltük. A tenyészedények talaját súlyra öntözéssel, közelítőleg a szabadföldi vízkapacitás értéken tartottuk.

Mérőkészülékek és elektródok



1. kép

A napraforgó gyökérkapacitásának mérése tűelektróddal

A kapacitás- és ellenállásméréseket GW814 és HP4284A típusú induktív-, kapacitás- és ellenállásmérő (LCR) készülékekkel végeztük. A GW814 készülék a kapacitásmérést 1 kHz frekvencián és 1 V kapocsfeszültséggel végzi. A kapacitás és ellenállás frekvenciafüggését 30 Hz és 1 MHz között a HP4284A precíziós LCR mérőhíddal határoztuk meg, amelynek szintén 1 V a mérőfeszültsége.

Talajelektródként 6,3 mm átmérőjű és 15 cm hosszú, rozsdamentes acélszondát használtunk, amelyet kb. 10 cm mélyen szúrtunk a talajba. A talajból kiálló szondához csatlakoztattuk a mérőkészüléket. Növényelektrodként injekciós tűt (1. kép), vagy síklapban végződő rúgós fémcspeszt alkalmaztunk, amelyhez a mérőkészülék pozitív bemenetét csatlakoztattuk.

A tüelektródot a gyökérnyak fölött a szár tengelyvonalával kb. 45° -ot bezáró szögben szúrtuk a szárba és töltük — a központi henger elérése érdekében — a szár középvonaláig. A központi henger elérését a kijelzett kapacitás meg növekedése jelezte. A növényelektródot a gyökérnyakra csíptettük. A talaj- és növényelektród között mért kapacitást és ellenállást, kb. 15-20 másodperc beállási idő után olvastuk le.

A csipeszelektród és a szár kontaktusa, valamint a csipesz-szár érintkezési felület növelése érdekében az EKG elektródokhoz használt, nagy vezetőképeségű gélt (UNIGEL) alkalmaztunk (Kendall et al., 1982) úgy, hogy a csipesz felhelyezése előtt a szárat az UNIGEL-lel vékonyan körbekentük.

A gyökér tömegének és hosszának a meghatározása

A talajból frissen kimosott gyökér tömegét mértük meg. Minthogy a gyökér friss tömegét döntően a víz határozza meg, a víz sűrűsége alapján számított térfogat a gyökértérfogat (V) becslését teszi lehetővé. Delta-T gyökérhossz- és felületmérő videokamerás készülékkel a gyökérzet teljes hosszát (L) mértük (Webb, 1989). Az átlagos gyökérsugarat a gyökértérfogat és a gyökérhossz ismeretében az $r = (V/\pi L)^{1/2}$ összefüggéssel számítottuk ki. A gyökérfelületet (RA) sima, henger alakú gyökérzetre az $RA = 2\pi r L$ összefüggéssel a gyökérhossz alapján határoztuk meg.

Elektromos kapacitás a talaj-növény rendszerben

A kolloid rendszerekre kidolgozott elektrokémiai módszerek elmélete nemcsak a talajra, hanem a talaj-növény rendszer dielektromos tulajdonságainak értelmezésére is alkalmazhatók, minthogy a növényi szövetek szintén diszperz, vizes kolloidrendszert alkotnak.

Az elektromosságban kapacitáson két felületen adott nagyságú elektromos potenciál hatására felhalmozódó töltés és feszültség hányadosát értik (Hilhorst, 1998). A kapacitás nagysága a töltéstároló felület nagyságától (A), a fegyverzetek távolságától (d) és a köztük lévő anyag dielektromos állandójától vagy permittivitásától (ϵ) függ.

A gyökér a talajban azonban természetesen nem ideális kondenzátorként viselkedik. A mérés során a talajban és a gyökérben is kialakulnak töltéstároló felületek és mobilizálható töltések. Minthogy a gyökérkapacitás mérésére 1 kHz frekvenciájú elektromos jelet alkalmaznak, a következőkben azt tárgyaljuk, hogyan hat a talajra és a gyökérre az elektromos mező (E -mező).

A talajt alkotó szemcsék felülete negatív töltésű, amelyhez legalább egy rétegben kationok adszorbeálódnak. Az adszorbeálódott kationréteget (Stern-réteg) egy diffúz szolvátréteg övezi (pl. Stefanovits et al, 1999). A

diffúz szolvátrétegben a víz dipólus molekulái a talajrészecske felületi és az ellenionréteg töltései szerint rendeződnek. A hőmozgás eredményeként a töltéstéren kívül a vízmolekulák véletlen elrendeződésűek. A gyökérkapacitás mérésekor alkalmazott külső E -mező ezt az elrendezést oly módon változtatja meg, hogy a víz dipólusokat erővonalak mentén rendezi. Az elektromos erővonalak mentén rendeződő vízmolekulákban töltésmegoszlás alakul ki, vagyis polarizálódnak. A polarizáció következtében megváltozott töltésmegoszlású rendszerben a polarizáció mértékével arányos, mérhető elektromos áram indul. A polarizáció új egyensúlyi állapotot hoz létre, az új elrendezés a felvett energiát eltárolja. Az E -mező kikapcsolása után az eltárolt energia disszipálódik, és a rendszer az E -mező előtti állapot visszaállása irányában rendeződik. A folyamat a dielektromos relaxáció.

A gyökér elektromos kapacitásának a mérésére Chloupek a polarizáció érdekében 1 kHz frekvenciájú elektromos jelet (E -mező) alkalmazott (Chloupek, 1972). Dalton a Chloupek által alkalmazott tű növényelektrodos gyökérkapacitást a gyökér központi hengerében lévő gyökérnedv és a talajoldat közötti membránfelületeken a polarizáció következtében kialakuló töltésként értelmezte (Dalton, 1995). Dalton a gyökeret határoló membránokat szigetelőnek, a xylemnedvet és a talajoldatot pedig vezetőnek tekintette. A gyökér külső felületét a talajoldattal, mint külső vezetővel tekinti kontaktusban levőnek. A dielektromos állandót és a geometriai tényezőket változó értékűnek, de a gyökér-talaj rendszerre egységesen jellemzőnek ítéli. A gyökérnyakban mért kapacitást a talajoldattal kontaktusban lévő, vagyis aktív gyökérelemek, mint párhuzamosan kapcsolt hengerkondenzátorok összegzett értékeként értelmezi. A hengerkondenzátor kapacitása (Dalton, 1995) szerint:

$$C = \frac{\varepsilon_i A_i}{4\pi r_{i2} \ln \frac{r_{i2}}{r_{i1}}},$$

ahol C a gyökérkapacitás, A_i a henger alakú gyökér felülete ($2\pi r_{i2} L$), L a gyökérhossz, r_{i1} a xylem sugara, r_{i2} a gyökér külső, talajoldattal érintkező sugara, ε_i a gyökérszövet dielektromos állandója.

A talajnedvesség-tartalmat, a talajoldat ionösszetételét és -koncentrációját a gyökérkapacitás további meghatározó elemeiként említi Dalton (1995).

A gyökérkapacitás Dalton által adott értelmezését a kolloid rendszerekre és az élő szövetek elektromos viselkedésére vonatkozó elektrokémiai vizsgálati eredmények is alátámasztják. Ezek közül kettőt említünk:

— A talaj mint töltött kolloid részecskékből álló vizes elektrolit kis frek-

vencián (≤ 1 kHz) a dielektromos állandó értékét közelítő permittivitással rendelkezik (Schwarz, 1962).

— A lágý, élő szövetek az 1 kHz alatti frekvencia-tartományban nagy permittivitással és kis elektromos vezetőképességgel rendelkeznek (Polk és Postow, 1986). A nagy permittitivitás a kolloid részecskéket körülvevő ellenionréteg polarizációja következtében minden olyan vizes rendszerben előfordulhat, ahol az érintkező felületeken ionréteg található (Schwartz, 1962).

Kis talajnedvesség-tartalom esetén az 1 kHz frekvenciájú gyökérkapacitás-mérést a víz-levegő határfelületek polarizációja hatására megnövekedő dielektromos állandó teszi lehetővé. Szabadföldi vízkapacitásig víztelített talajban a dielektromos állandó azonban már a kettősréteg-polarizáció következtében nő meg (Hilhorst, 1998).

A növényi szárra helyezett csipesz alkalmazásakor a váltakozó frekvenciájú elektromos jel ugyancsak a xylemnedv membránfelületi rétegét polarizálja. A csipeszelektróddal mérhető gyökérkapacitást tanulmányoztuk azért, hogy a csipesz- és a tűelektrod által kiváltott polarizáció gyökérkapacitásra gyakorolt hatását megállapítsuk.



2. kép

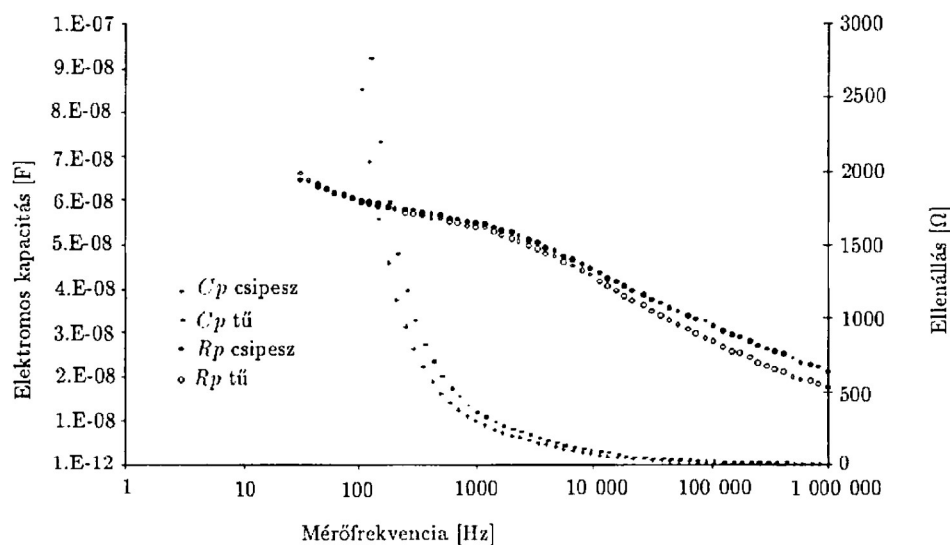
A gyökérkapacitás mérésére nevelt, különböző fejlettségi állapotú napraforgók

A növényelektrod

A gyökérkapacitás-mérések, pl. a tűelektrod központi hengerbe szúrás bizonytalanságának csökkentésére csipeszelektrodot alkalmaztunk. A csipeszelektrod előnye továbbá, hogy a növényt nem sebz meg. Összehasonlítottuk a gyökérnyakba szúrt injekciós tűvel, és a gyökérnyak fölött az UNIGÉL-lel körbekerített szárra helyezett csipeszelektróddal ugyanazon a növényen mért kapacitásokat. Tenyészedényben nevelt napraforgón tű- és csipeszelektróddal mért kapacitás- és ellenállásértékek frekvenciafüggését az 1. ábrán mutatjuk be. Látható, hogy a kapillárisan víztelített talajban a csipeszelektróddal mért kapacitás 1 kHz-en kisebb a tűelektróddal mértéknél. A

frekvencia csökkenésével az eltérés mértéke nő, míg a frekvencia növekedésével csökken.

Tíz (3, 3 és 4 db) — azonos körülmények között, tenyészedényben nevelt — 8, 14 és 18 leveles fejlettségi állapotú napraforgón (2. kép) tanulmányoztuk a tű- és csipeszelektrodos kapacitásmérések eredményeit (2., 3. és 4. ábra). A kapillárisan víztelített és a közel szabadföldi vízkapacitású talajban (2. és 3. ábra) tű- és csipeszelektroddal mért gyökérkapacitás-értékek eltérése a talaj nedvességtartalmának csökkenésével növekedett.



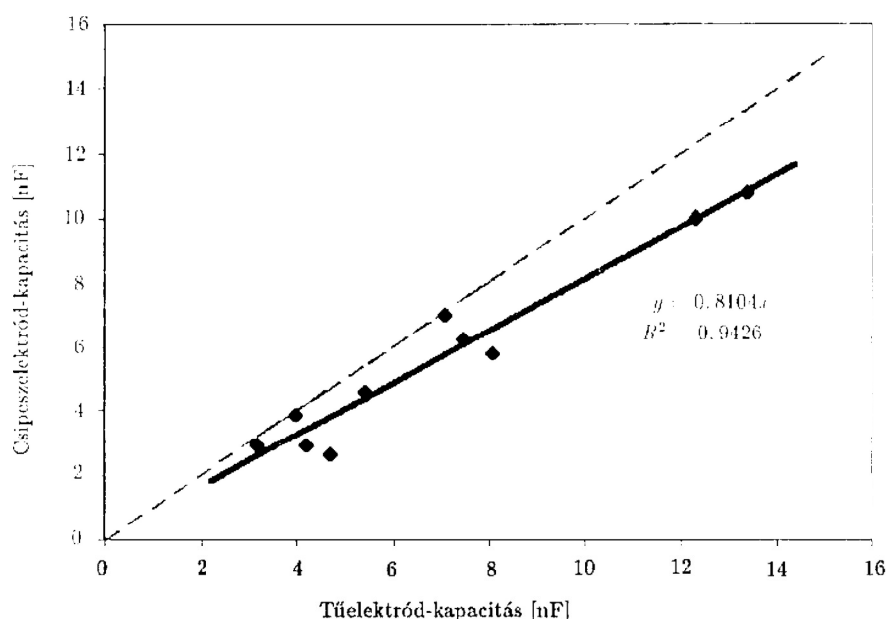
1. ábra

A napraforgógyökér HP4284A készülékkel mért kapacitása és ellenállása a frekvencia függvényében

A csipeszelektrod

A szárra helyezett csipeszelektrod és a gyökér központi szállító edényében található xylemnedv nincs közvetlen elektromos kontaktusban. Hogyan mérhető mégis a xylemnedvbe vezetett tűelektrodéhoz hasonló kapacitás és miből adódik az eltérés? A kérdésre a választ a következőkben adjuk meg:

A szárat körülölelő, nagy vezetőképességű gélre csíptetett elektródra vezetett E -mező a szárszövetek és így a központi szállítószövet sejtmembránjainak felületén található dipólusokat polarizálja. A polarizáció mértéke azonban a xylemnedvbe szűrt tűelektroddal kiváltott polarizációnál kisebb, mert a szárra kent gélből a központi hengert polarizáló E -mező energiája a közbenső szárszövetek polarizációja következtében csökken. A központi hengert elérő E -mező membránfelületet polarizáló energiája tehát kisebb, mint a xylemnedvvel közvetlen kontaktusban lévő tűelektrod esetében. Valószínű, hogy az E -mező energiavesztesége növényfajonként és egyedfejlődési fázisonként is eltérő.



2. ábra

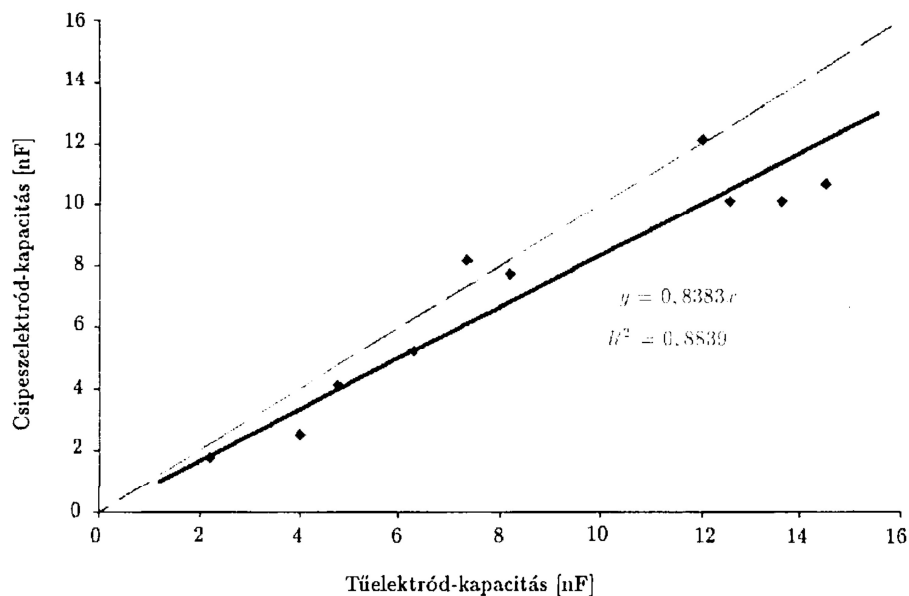
Napraforgó tű- és csipeszelektroddal

1 kHz frekvencián, közel víztelített talajban mért gyökérkapacitása

Mérési tapasztalataink szerint a tüelektrod helyett az UNIGÉL és a csipeszelektrod alkalmazása a vízkultúrába helyezett növények gyökérkapacitásának mérésekor hibahatáron belül közel azonos eredményű (4. ábra). A csipeszelektrod oldatkultúrán kívüli alkalmazhatósága azonban további vizsgálatokat tesz szükségessé. A vizsgálatok többek között a gyökérkapacitás talajnedvesség-tartalom függésének megállapítása miatt szükségesek.

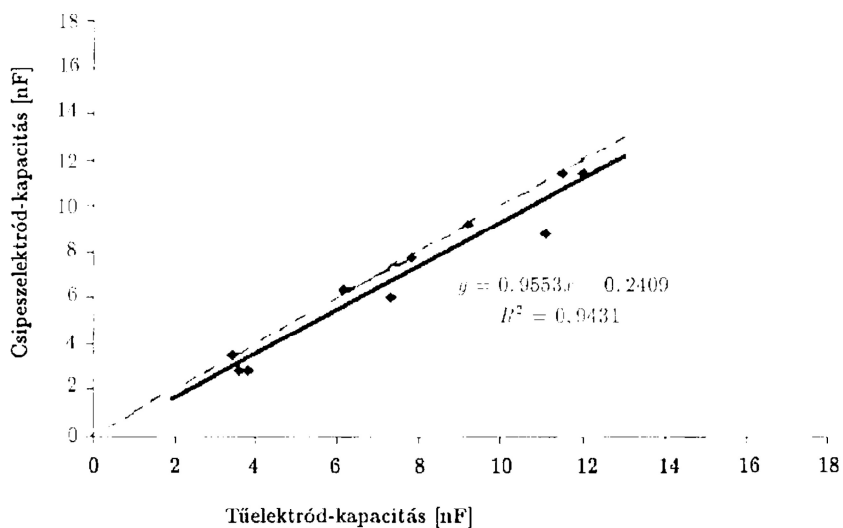
A gyökérkapacitás értelmezése

A növény- és a talajelektroddal végzett mérés egy biológiai membránhálózat — a gyökérrendszer —, valamint a talajrészecskéket bevonó talajoldatmembrán polarizációja következtében mérhető komplex impedanciát, és azzal összefüggő kapacitást fejez ki. A mért kapacitást a gyökérben és a talajrészecskéken polarizált membránfelületeken mint fegyverzeteken felhalmozódó, adott feszültségű töltés alakítja ki. A polarizáció következtében kialakuló, elektromosan vezető gyökér- és a talajmembránok — „fegyverzetek” — között két különböző dielektrikum — a gyökérszövet és a talaj — helyezkedik el. Az 5. ábrán vázolt elrendezésben a talaj-gyökér rendszer elektromos helyettesítő képe egy olyan kondenzátor, amelynek a fegyverzetei között két, különböző permittivitású dielektrikum található. A két-dielektrikumú kondenzátor kapacitása két sorba kötött kondenzátor kapacitásként írható fel (Budó, 1972). A két-dielektrikumú kondenzátor eredő kapacitása a kisebb kapacitású kondenzátor kapacitását közelíti.



3. ábra

Napraforgógyökér tű- és csipeszelektróddal
1 kHz frekvencián, szabadföldi vízkapacitású talajban mért kapacitása



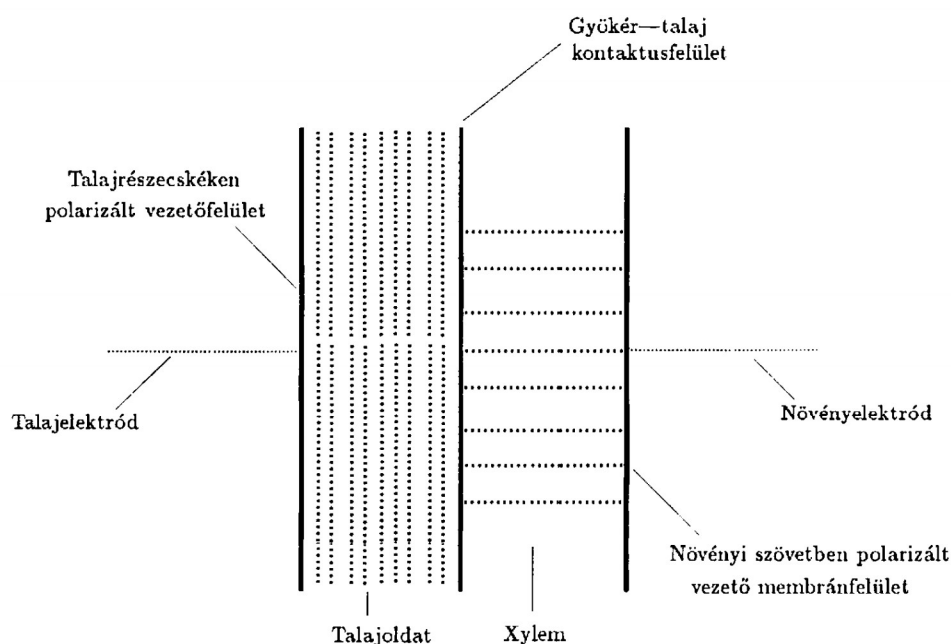
4. ábra

Napraforgógyökér tű- és csipeszelektróddal
1 kHz frekvencián, vízkultúrában mért kapacitása

A 5. ábrán látható helyettesítő kép a gyökérkapacitás-mérési eredmények — alábbiakban megadott — értelmezését teszi lehetővé:

A kapacitás és az impedancia frekvenciafüggését a HP4284A mérőhíd-dal a talajra két talajelektrod, a talajban lévő gyökerre tüelektrod és talajelektrod (6. ábra), és a napraforgó gyökerébe szúrt két tüelektrod között mértük (7. ábra). A napraforgó gyökerimpedanciája és fázisszöge a dielektromos veszteség dominanciáját mutatja 1 kHz-en (6. ábra).

A talajból kimosott gyökérdarabon mért impedancia 1 kHz-en (7. ábra) a talajénak (6. ábra) közel a négyszerese. A fázisszög alapján a talajban lévő gyökér és a talaj kapacitív jellege 1 kHz-en minimális (6. ábra). A talajból kimosott gyökér fázisszöge 1 kHz-en mintegy ötszöröse a talajénak, és kétszerese a talajban mért gyökérének.

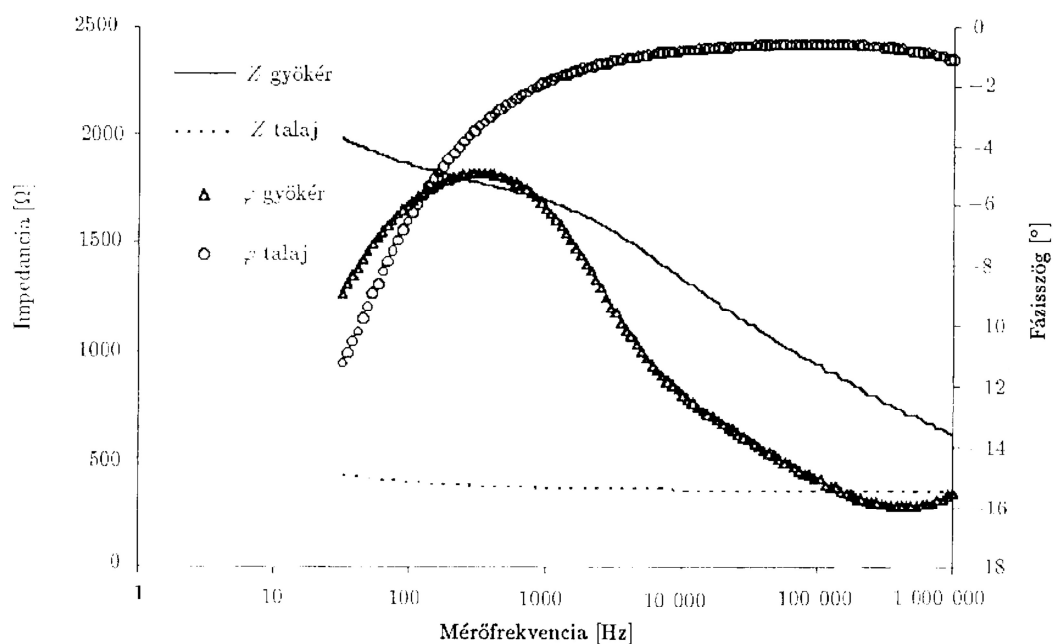


5. ábra

Kondenzátorként értelmezett, 1 kHz-en mért talaj-gyökér rendszer vázlata

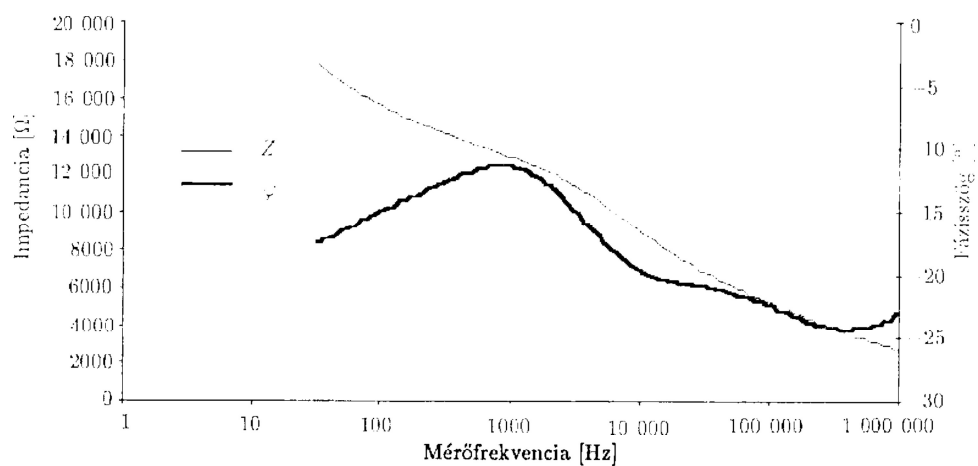
Az 1. ábrán látható, hogy a napraforgógyökér kapacitása a talajban az 1 kHz-nél nagyobb frekvenciákon folyamatosan csökken, az alacsonyabb frekvenciákon pedig nő. Ennek eredményeként alkalmazzák a gyökérkapacitás mérésére az 1 kHz frekvenciát.

A kétdielektrikumú kondenzátor helyettesítő képéből következik, hogy a gyökérkapacitást a gyökér kisebb (az 1. ábra alapján 10^{-8} F) és a talaj nagyobb (a 6. ábrán 10^{-5} F) kapacitása alakítja ki. A kapacitás a kondenzátorfegyverzetek és a dielektrikumok felületének a nagyságától is függ. Ideális kondenzátor esetében a fegyverzetek és a dielektrikumok felülete azonos. A talaj-gyökér kapacitás mérésekor viszont a fegyverzetek és a dielektrikumok felületének a nagysága talaj- és növényfüggő. A gyökérben polarizált „növénykondenzátor”-fegyverzet nagysága a növény élettani és a gyökér fej-



6. ábra

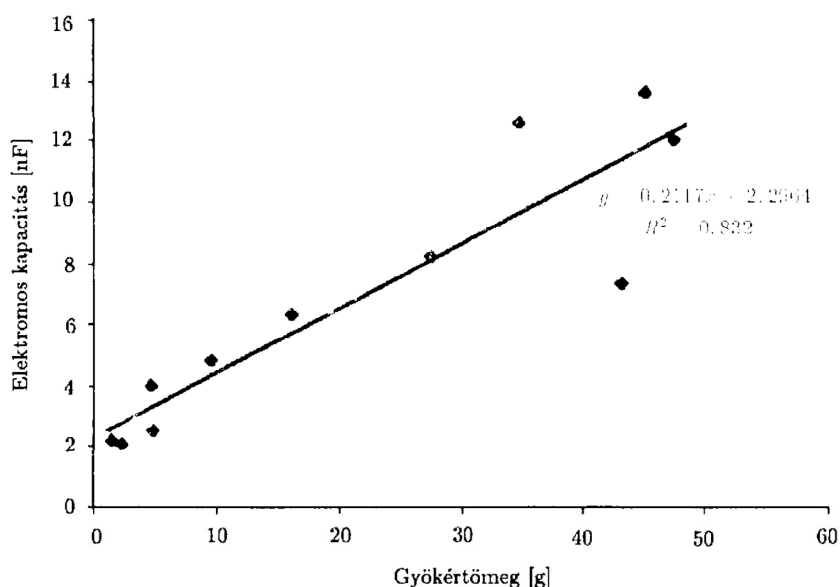
A talaj és a gyökér HP4284A készülékkel mért impedanciája és fázisszöge a mérőfrekvencia függvényében



7. ábra

Napraforgó gyökérdarab HP4284A készülékkel mért komplex impedanciája és fázisszöge a mérőfrekvencia függvényében

lettségi állapotának a függvénye. Az 5. ábra segítségével a gyökérkapacitás talajnedvesség-tartalomtól való függése értelmezhető. A talajban polarizált membránfelület — a „talajkondenzátor”-fegyverzet — nagysága ugyanis a talaj nedvességtartalmának a függvénye. A gyökér és a talajdielektrikumok közös, érintkező felülete szintén a gyökérméret és a gyökéraktivitás függvénye. A gyökér és a talajkapacitások sorba kapcsoltsága azért valószínű, mert a gyökérkapacitás a növényi gyökér kapacitását közelíti. A dielektrikumfelület nagysága a növényi fejlődés és az élettani aktivitás gyökérkapacitásában betöltött szerepével hozható összefüggésbe. Nagyobb tömegű és hosszabb gyökér ugyanis a talajjal több „ponton”, nagyobb felületen kapcsolódik, a nagyobb dielektrikumfelület pedig a gyökérkapacitást növeli.



8. ábra

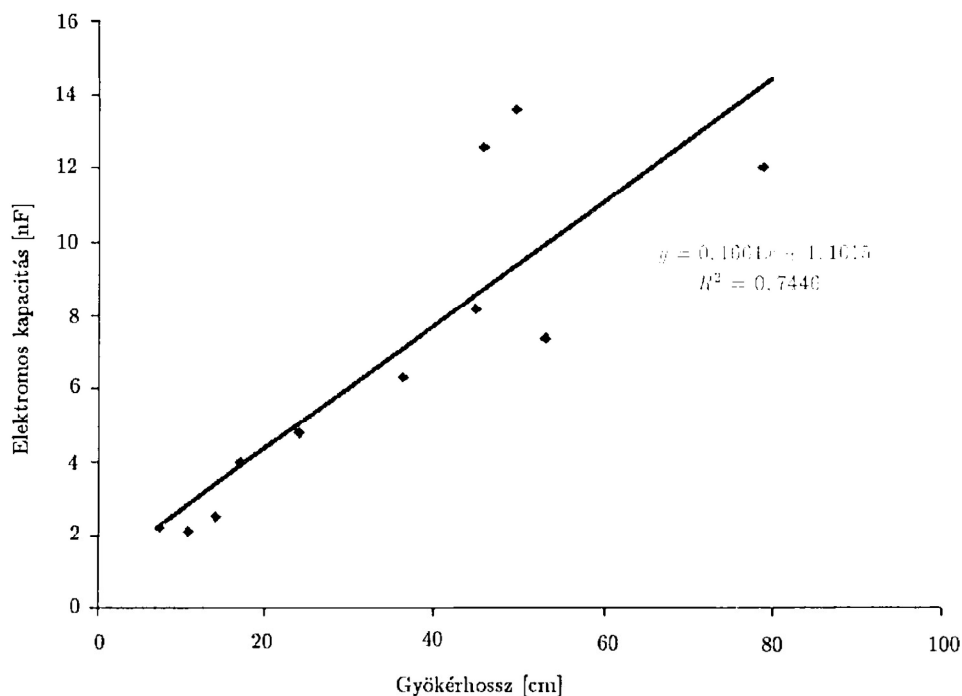
Tenyészedényben nevelt, különböző fejlettségi állapotú napraforgók gyökértömege és tüelektróddal, 1 kHz-en mért kapacitása

Gyökérkapacitás-mérési tapasztalatok

A tenyészedényben nevelt napraforgók gyökérkapacitását a növények egyedfejlődése során mértük és — a gyökértömeg és méret növekedésével összhangban — a kapacitás értékek növekedését figyeltük meg, ahogy az a tüelektródos mérési eredményeket bemutató 8. és 9. ábrákon látható.

A tenyészedény-kísérletben kapott eredmények azonban — a kapacitás-mérés értelmezésekor felsorolt növény- és talajjellemzőktől való soktényezős függés következtében — nem vihetők át közvetlenül szabadföldi viszonyokra. Ebből következik, hogy a laboratóriumban mért gyökérkapacitás-értékek azt igazolják, hogy azok a gyökértömeget és a gyökérhosszat jól jellemzik. A ka-

pacitásérték és a gyökérjellemzők mennyiségi kapcsolata azonban csupán kalibrálást követően alkalmazható más növényre vagy mérési feltételre.



9. ábra

Tenyészedényben nevelt különböző fejlettségi állapotú napraforgók gyökérhossza és tűlelektróddal, 1 kHz-en mért kapacitása

Szabadföldön a gyökérkapacitás-mérés módszertana még nincs kellően kidolgozva. A tenyészedényes és a vízkultúrák, vagyis nem szélsőséges feltételek között a gyökérkapacitás egyértelműen a gyökérműködés és a gyökérfejlődés aktuális állapotát jelzi. A kísérleti mérések a gyökér tömegének és hosszának a növekedésével növekvő gyökérkapacitást mutattak. Tápoldatban nevelt növények gyökérfejllettsége és a mért kapacitása közvetlenül megfigyelhető volt. A növénytömeg a kapacitásmérést követően közvetlenül lemérhető, és a növényt a tápoldatba visszatéve a kísérlet folytatható. A tápoldatos vizsgálatok egyik hasznosítható eredményét a következő megfigyelés jelentette: ideális fény-, hő-, víz- és tápanyagviszonyok között kalászoslag felnevelt búzának a 8. hét után nem volt mérhető értékű gyökérkapacitása. Valószínű, hogy ezt a növények aktív működésének, így víz- és tápanyagfelvételének a leállása idézte elő. Értelmezésünk szerint megszűnt a tápoldat és a gyökérdielektrikum közötti aktív felület. A nulla közös dielektrikum-felület miatt nem jött létre a tápoldat- és gyökérkapacitások sorba kapcsoltsága, és ezért nem volt mérhető gyökérkapacitás annak ellenére, hogy kifejllett, nagy gyökértömegű növényt mértünk. Hasonló tapasztaltunk volt szabadföldön homokpusztai magyar csenkesz (*Festuca vaginata*) növények-

kel. A gyökérkapacitás-mérést augusztusban végeztük, amikor a csenkeszek termésérést követő, vegetáló állapotúak. A homoki növényállományban a csenkeszeknek nem volt mérhető gyökérkapacitása. Annak a lehetőségnek a kizárására, hogy kapacitást a légszáraz homoktalaj miatt nem mértünk, a csenkesz töve körül a talajt megöntöztük. Öntözés után kb. 20 perccel a gyökérkapacitás-mérést megismételtük. Mérhető gyökérkapacitás azonban továbbra sem jelent meg. A tápoldatos kísérletben tapasztalt jelenség tehát szabadföldi körülmények között fordult elő. Az eredményt az évelő magyar csenkesz nyári, száraz időszakban jellemző inaktív, „alvó” állapotával magyaráztuk, ami a gyökérműködés leállását jelenti. A terepi mérési tapasztalat a gyökérkapacitás-mérés ökológiai alkalmazhatóságára, illetve az abban rejlő lehetőségekre hívja fel a figyelmet.

A gyökérkapacitás mérésének mezőgazdasági jelentősége a gazdasági növények fejlődésének folyamatos megfigyelésében jelölhető meg. A mérési módszer segítségével várhatóan a tápanyaghiány-tünetek, a növényvédőszer- és a nehézfémhatások eddig nem vizsgált mechanizmusai, valamint a környezeti tényezők gyökérzetre, illetve a növényi aktivitásra kifejtett hatásai tárhatók fel. A gyökérkapacitás-mérés gyakorlati alkalmazásáig azonban még további vizsgálatok és tapasztalatgyűjtés szükséges.

Összefoglalás és következtetések

Az élő gyökér vizsgálatára az ökofiziológiában és a mezőgazdasági gyakorlatban új lehetőségeket nyújtó elektromos mérési módszert alkalmaztunk. A gyökérkapacitás mérési elvét a talaj-gyökér rendszerre kidolgozott helyettesítő képre értelmeztük. A növényt nem sebző, egyszerű és megbízható növényelektródot kerestünk. Új növényelektrodként az elektromosan vezető géllal bekent gyökérnyak fölött a szárra csíptetett, lapos végű fémcsipeszt alkalmaztunk. A csipesz- és a talajelektród által közvetített elektromos tér a növényyszöveti membránokat és a talajrészecskéket bevonó oldatfilmet polarizálja. A gyökérkapacitás méréseket tenyészedényben és tápoldatban nevelt napraforgókon végeztük. Azt tapasztaltuk, hogy vízkultúrában a csipesz- és a tüelektroddal mért gyökérkapacitás közel azonos, míg talajban az eltérés mértéke a nedvességtartalom csökkenésével növekedett. Megállapítottuk, hogy:

- a csipeszelektród alkalmazása további vizsgálatokat tesz szükségessé;
- a gyökérkapacitás a kétdielektrikumú kondenzátor modellben a gyökérszöveti membránt bevonó xylemnedv és a talajrészecskék felületét bevonó talajoldat dielektrikumok „érintkező” felületének, valamint a gyökérben és a talajban polarizált membrán felületének a nagysága és az azokon felhalmozódó töltésmennyiség által meghatározott; a GW814 kereskedelmi forga-

lomban beszerezhető, egyszerű és olcsó kapacitásmérő készülék megfelelő a gyökérkapacitás mérésére.

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott munka anyagi támogatását az T022087 számú OTKA kutatás biztosította, amelyért a szerzők köszönetüket fejezik ki.

Irodalom

- [1] ANRÉN O., HANSON A-C., VÉGH K. R. 1993. Barley root growth and nutrient uptake from two soil types in rhizotron with vertical and horizontal minirhizotrons. *Swedish J. Agric. Res.* 23, 115—126.
- [2] BUDÓ Á. 1972. Kísérleti fizika II. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- [3] CAMPBELL A. G., PHILLIPS D. S. M., O'REILLY E. D. 1962. An electronic instrument for pasture yield estimation. *Journal of the British Grassland Society* 17, 89—100.
- [4] CHLOUPEK, O., SKÁCEL, M., EHRENBEGOVA, J. 1999. Effect of divergent selection for root size in field-grow alfalfa. *Canadian J. of Plant Sci.*, 79, 93—95.
- [5] CHLOUPEK, O. 1972. The Relationship between electric capacitance and some other parameters of plant roots. *Biologia plantarum* 14, 227—230.
- [6] CHLOUPEK, O. 1977. Evaluation of the size of a plant's root system using its electrical capacitance. *Plant and Soil*, 48, 525—532.
- [7] DALTON, F. N. 1995. In-situ root extent measurements by electrical capacitance methods. *Plant and Soil* 173: 157—165.
- [8] HILHORST, M. A. 1998 Dielectric characterisation of soil. Doctoral Thesis, Wageningen Agric. Univ. pp. 141.
- [9] HYDE, F. J, LAWRENCE, J. T. 1964. Electronic Assessment of pasture growth. *Electronic engineering*: 666—670.
- [10] JOHNS, G. G., NICOL, G. R., WATKIN, B. R. 1965. A modified capacitance probe technique for estimating pasture yield. I. Construction and procedure for use in the field. *Journal of the British Grassland Society* 20, 212—217.
- [11] JOHNS, G. G., NICOL, G. R., WATKIN, B. R. 1965. A modified capacitance probe technique for estimating pasture yield. II. The effect of different pastures, soil types and dew on the calibration. *Journal of the British Grassland Society* 20, 217—226.
- [12] KENDALL, W. A., PEDERSON, G. A., HILL, R. R. 1982. Root size estimates of red clover and alfalfa based on electrical capacitance and root diameter measurements. *Grass and Forage Science* 37, 253—256.

- [13] POLK, C., POSTOW, E. (eds.) 1986 Handbook of biological effects of electromagnetic fields. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida. pp. 56—57.
- [14] SCHWARZ, G. 1962. A theory of the low frequency dielectric dispersion of colloidal particles in electrolyte solution. J. Phys, Chem., 66, 26—36.
- [15] Trase System1 Operating Instructions, Soil Moisture Corp., 1990.
- [16] STEFANOVITS P, FILEP GY, FÜLEKY GY. 1999. Talajtan. Mezőgazda, Budapest.
- [17] WEBB, N. (ed.) 1989. Root length measurement with the Area Meter Mark 2 using computer software Root Version 3, Delta-T Devices LTD.